

ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА АГЛОМЕРАЦИИ

Аннотация

В данном докладе отражены основные комплексные математические модели процесса спекания железорудных материалов, разработанные в разных странах. Показаны особенности этих моделей и параметры, принимаемые во внимание при проведении расчетов. Также представлены выходные данные моделей.

Ключевые слова: агломерация, спекание, математическая модель, прогнозирование, теплообмен.

Abstract

The basic complex math models of iron ore material sintering process developed in different countries are given in this report. The features of these models and parameters to be taken into account in the calculations are shown. Output data of the models are also presented.

Keywords: sintering, mathematical model, prediction, heat transfer.

В технологиях получения металлопродукции из черных металлов и сплавов важную роль в снабжении сырьем доменной плавки занимает производство агломерата. Основу этой технологии составляет процесс спекания обогащенных железных руд. Вместе с тем этот процесс спекания, являясь ключевой технологией, позволяет перерабатывать также и вторичные материальные ресурсы в виде железосодержащих отходов – пыли, шламов, не только агломерационных фабрик, но и других металлургических переделов.

Используемое сырье – от железной руды до оборотной пыли и флюсов, по своему составу и качеству может варьироваться в широких пределах. Для железной руды эта зависимость проявляется через минеральные составляющие руды и технологию ее добычи. Ко второй, не менее важной составляющей агломерируемой шихты, определяющей и качество агломерата и его стоимость, относятся некоторые виды топлива – кокс, топливные газы, мазут, которые обеспечивают процесс спекания необходимой тепловой энергией. В настоящее время эти виды топлива получают из угля, нефти, которые относятся к невозобновляемым природным ресурсам. Стоимость этих ресурсов непрерывно растет по вполне понятным причинам, связанным с истощением существующих месторождений и необходимостью разведки и ввода в эксплуатацию новых. Это в конечном итоге сказывается на стоимости получаемого агломерата. Поэтому естественным было стремление искать новые источники тепловой энергии для агломерационной технологии.

Использование железных руд и топлива новых месторождений, новых видов отходов в технологиях агломерации требуют предварительного технико-экономического и экологического анализа и оценки, в результате чего могут быть отобраны наиболее оптимальные по удельному расходу топлива и предполагаемым технологическим показателям качества продукта варианты будущей технологии производства агломерата. Другими словами, такой подход позволяет определить те компоненты доступного сырья и приготовленные из них смеси, которые будут соответствовать требованиям производства качественного агломерата для выплавки чугуна в доменной печи или для других технологий металлургии железа. Основу для проведения такого анализа составляют математические модели.

Спекание железных руд относится к технологиям, объединяющим различные сложные физические и химические явления. Но, несмотря на сложность технологии, неоднократно предпринимались и предпринимаются в настоящее время попытки создать комплексные математические модели, в той или иной мере отражающие различные стороны этой технологии. Главное стремление при разработке моделей сводится к созданию методов прогнозирования и оценки таких наиболее важных параметров как восстановимость, прочность и гранулометрический состав получаемого в процессе спекания агломерата. Эти параметры оказывают существенное влияние на технико-экономические показатели работы доменной печи.

Вэйтер и его коллеги [1] разработали математическую модель для прогнозирования гранулометрического состава готового агломерата, однако, как отметили сами авторы, в модели не учтена кинетика процесса спекания, которая значительно влияет на конечное распределение размеров агломерата и его поведение в доменной печи. Касаи и др. [2; 3] исследовали структуру агломерата на его макроскопические свойства. В своей работе они сосредоточили внимание на объяснение механизма спекания и на уточнение сил связи при взаимодействии частиц. Авторы пришли к выводу, что порозность слоя и удельная поверхность зерен шихты являются основными параметрами, влияющими на прочность агломерата. Они также пришли к выводу, что движущими силами для структурных изменений в агломерате являются сжимающие и капиллярные.

Акияма исследовал теплообмен в слое агломерата [4] и установил эмпирические зависимости для теплопроводности материала. Механизм окисления и формирования соединений фаз в процессе спекания изучал Янг [5]. Ямаока и Кавагути исследовали изменения свойств агломерата в трехмерном измерении, полученного в аглочаше с целью прогнозирования свойств агломерата на основе типовых переменных и измерений [6]. Разработаны также комплексные математические модели, описывающие процесс спекания железорудных материалов на промышленных конвейерных машинах, известных за рубежом как процесс Дуайт-Ллойда. Миттерленер и его коллеги [7] представили одномерную математическую модель процесса спекания на агломашине, сосредоточив свое внимание на влиянии скорости продвижения фронта спекания на качество агломерата. Камминг и Торнлби параллельно с Натхом и его коллегами [8, 9] разработали двумерную математическую модель, основанную на уравнениях переноса тепла и массы, однако она учитывает лишь несколько химических реакций, а скорость фазовых превращений была упрощена.

Таким образом, представленные выше модели, отражая различные особенности закономерностей процесса спекания агломерата, не представляют возможностей для описания полной картины агломерационного процесса. Такие возможности могут быть получены с помощью комплексных математических моделей, способных описать полноту химических

реакций с учетом источников (стоков) тепла и массы. К сожалению, таких моделей создано не так уж много. Ниже приведены описания комплексных моделей зарубежных ученых, которые, по мнению авторов наиболее близки к отражению особенностей процессов спекания в производстве агломерата на конвейерных машинах.

Математическая модель Жозе Эдилсон де Кастро

Жозе Эдилсон де Кастро [Федеральный университет Флуминенсе (Бразилия)] разработал трехмерную математическую модель процесса спекания железной руды, созданную на основе многофазных многокомпонентных концептуальных представлений и подробных взаимодействий между газовой и твердой фазой [10]. Она предназначена для изучения параметров процесса спекания и внутренних явлений в нем. Модель применяется для изучения новых технологий спекания на основе альтернативных источников топлива. Также с ее помощью можно оценивать новые оперативные разработки и экологические проблемы, связанные с применением нового сырья. Модель проверена по экспериментальным данным, полученным на аглочаще, и применена для исследования промышленной технологии на агломерационной машине. Модель учитывает следующие явления:

- динамическое взаимодействие смеси газов с твердыми частицами;
- теплопередачу конвекцией и излучением для всех фаз;
- кинетику испарения и конденсации воды;
- разложение карбонатов;
- восстановление и окисление железосодержащих материалов;
- горение кокса и газификацию;
- образование летучих веществ;
- усадку уплотненного слоя;
- частичное оплавление и повторное затвердевание твердых веществ;
- фазовые переходы с образованием алюмокальциевых силикатов.

Данная модель существенно отличается от других учетом явлений тепло- и массопереноса в трехмерной постановке для агломерационной ленты, а также детального механизма химических реакций, характерных для процесса спекания. Межфазные взаимодействия в комплексной модели представлены полуэмпирическими подмоделями для передачи импульса, обмена энергией за счет химических реакций, теплопроводности, конвекции и излучения.

Математическая модель Tata-центра развития исследований и проектно-конструкторского центра совместно с Tata Steel (Индия)

Этот творческий коллектив при создании модели [11] спекания уделил внимание необходимости рассчитывать профили температуры шихты, зоны горения агломерата с достаточной точностью в широком диапазоне условий работы агломашины. При этом были учтены все основные физико-химические явления. Однако некоторые реакции спекания железных руд, такие как разложение гематита до магнетита, повторное окисление магнетита до гематита и образование феррита кальция, не были учтены в материальном и энергетическом балансах, потому что они незначительно влияют на окончательные результаты моделирования. Кроме того, соответствующие данные по кинетике этих реакций отсутствуют в опубликованной литературе. Даже, если учтены только те реакции, для которых доступны подробные кинетические закономерности скоростей реакций, созданная модель является общей в том смысле, что легко могут быть добавлены как дополнительные схемы реакций, так и новые

кинетические выражения и соответствующие константы скорости, когда они станут доступными.

Модель спекания предназначена для нестационарного режима, т. к. параметры процесса спекания: температура газа, скорость газа, концентрация кислорода, диоксида углерода и водяного пара, изменяются в основном по высоте слоя. В равной степени это относится и к характеристикам процесса: к температуре твердых частиц, к относительной массе влаги, к коксовой мелочи, известняку, расплаву и к кажущейся плотности твердых частиц, которые изменяются во времени (или по длине ленты в случае агломашины).

Модель основывается на следующих допущениях, которые обычно принимают при математическом описании реакций между твердым веществом и газом в плотном слое:

- Теплообмен происходит исключительно за счет вынужденной конвекции, то есть доля излучения в общем тепловом балансе является незначительной. Теплопроводностью в газовой фазе пренебрегают из-за высокой турбулентности газового потока.
- Тепловое сопротивление внутри твердых частиц значительно, что не может обеспечить равномерное распределение температуры в горизонтальном сечении вертикального элемента слоя в любой момент времени.
- Контактной теплопроводностью между твердыми частицами можно пренебречь.
- Газовый поток одномерный, диффузия и дисперсия в жидкой фазе незначительны по сравнению с конвекцией.
- Слой состоит из сферических гранул или квазичастиц. Химические реакции в частицах кокса и известняка начинаются на поверхности частиц и постоянно распространяются внутрь, четко определяя подвижную границу, то есть количество основного непрореагировавшего материала, масса которого с течением времени постепенно уменьшается.
- Компоненты агломерационного газа обладают идеальными свойствами.

В результате проверки истинности модели и ее точности экспериментально был подтвержден предсказанный общий перепад давления, близкий к измеренному значению в каждый момент времени путем повторяющихся измерений расхода газа в верхней части слоя [11].

Математическая модель, разработанная в CRM (Centre for Research in Metallurgy, Льеж, Бельгия)

Математическая модель CRM [12] имеет модульную структуру, состоит из основной модели как центральной части комплексной модели, отражающей главные процессы спекания, и вспомогательных моделей, предназначенных для:

- перекодировки производственных входных данных в начальные и граничные условия модели спекания;
- определения параметров газа с учетом его рециркуляции на стадиях обработки слоя, в отдельных вакуум-камерах и на трубе;
- моделирования отдельного охлаждения агломерата с применением котла-утилизатора.

Агломерационная машина моделируется в стационарном состоянии. Система дифференциальных уравнений решается методом конечных разностей.

В качестве входных данных модели, среди прочих, задаются: схема и геометрия агломерационной машины и охладителя, химические и физические свойства шихты, подаваемой

на ленту, высота слоя, условия зажигания для каждой последующей зоны спекания (до четырех), разрежение, состав и температура входного газа, значение температуры зажигания, поперечная неоднородность слоя, условия эксплуатации охладителя агломерата и котла-утилизатора. В случае рециркуляции отходящих газов из коллекторов в технологические зоны агломашины задается значение концентрации кислорода в рециркуляте.

Явления процесса спекания, которые принимаются во внимание, в основном следующие:

- теплообмен между газом и твердыми частицами;
- сопротивление движению газа по высоте слоя (Закон Эргона);
- обезвоживание, декарбонизация (разложение гидратов и разложение известняка);
- взаимосвязь фронта горения с углеродом твердого топлива и газом, всасываемым через слой агломерата;
- плавление и кристаллизация, в упрощенном виде, с использованием более высокой кажущейся удельной теплоемкости твердых тел выше пороговой температуры;
- горение органической серы и серного колчедана;
- поглощение SO_2 в зоне сушки и зоне переувлажнения слоя агломерата;
- термическое разложение сульфата кальция.

Обычно явления, происходящие внутри фронта горения, в существующих ныне математических моделях часто моделируют только полное сгорание углерода в его диоксид. Поскольку одной из основных задач математической модели, разработанной в CRM, является ее комплексность, включающая и оценку воздействия на окружающую среду процесса спекания, то в ней учитываются также выбросы оксида углерода.

Кроме того, в случае рециркуляции отходящих газов, увлажнения воздуха развиваются реакции газификации углерода паром и/или диоксидом углерода. Тепловые эффекты этих явлений в процессе спекания могут оказаться значительными. Поэтому при рабочем моделировании технологии агломерации необходимо учитывать не только окисление углерода кислородом воздуха, но и возможность его реагирования с паром и диоксидом углерода на поверхности коксовой мелочи.

Возможное дожигание водорода и оксида углерода также учтено в комплексной модели. Процессы дожигания указанных компонентов, как правило, происходят в основном газовом потоке, благодаря тому, что в слое частиц агломерата всегда существует окислительная среда.

Разработанная в CRM математическая модель при ее использовании позволяет определять температуры и состав компонентов шихты и газа, скорость и давление газа в любой точке внутри слоя на агломерационной ленте и в охладителе, а также время тепловой обработки шихты, «показатели степени спекания» (например, максимальную температуру, достигнутую в ходе спекания) в зависимости от глубины, характеристик отходящих газов в вакуум-камерах (расхода, температуры и состава, в том числе CO и SO_2), температуры агломерата в конце ленты и на выходе из охладителя и потенциальной скорости парообразования конечным котлом-утилизатором. Этих данных вполне достаточно не только для прогнозирования рациональных тепловых и газодинамических режимов работы агломерационных машин конвейерного типа, но и для управления процессом спекания [12].

Познакомив читателя с результатами разработок зарубежных ученых, подчеркнем: научная деятельность советских, российских и украинских ученых по созданию математических моделей, описывающих различные физико-химические явления и газодинамические процессы технологии производства агломерата, свидетельствует о значительных достижениях в этой области знаний. Русскоязычные технические источники информации – монографии, журнальные статьи, диссертации, содержат достоверные опытные, промышленные и экспериментальные результаты исследований процессов производства агломерата, физические и математические модели не только относительно простые – отдельных явлений, но и достаточно сложные – трехмерные комплексные. В приводимом библиографическом списке [13–28] указаны преимущественно монографии, в которых обобщены сведения многих исследователей агломерационного процесса. В этой литературе значительную часть занимает описание механизмов физико-химических и газодинамических явлений, раскрывающих картину формирования агломерата от процессов сушки до процессов охлаждения агломерата. Эта часть работ, как правило, используется для физической формулировки математических моделей. Другая часть, основанная на закономерностях теории тепло- и массообмена в плотном неподвижном слое, отражает уровень математического описания процессов горения топлива, нагрева и охлаждения слоя при наличии источников и стоков тепла и массы, обусловленные тепловыми эффектами и характером химических реакций. Эта часть работ напрямую связана с математическим моделированием. По этим работам можно проследить историю комплексных многомерных математических моделей и результаты их применения в современной практике производства агломерата.

Результаты моделирования углубили научные представления о сложных явлениях агломерационного процесса и явились основой для совершенствования и управления технологиями производства агломерата.

Развитие любой технологии в металлургии невозможно без использования информационных систем, помогающих персоналу вести технологический процесс наиболее эффективно и безопасно. Информационные системы работают наиболее эффективно, если их основу составляют математические модели технологического процесса. Их комплекс и составляет ту модельную систему поддержки принятия решений, которая позволяет прогнозировать ход и результат технологического процесса при изменяющихся условиях его проведения. Учеными всего мира разрабатываются комплексные инструменты для совершенствования технологии агломерации и прогнозирования металлургических свойств готового агломерата. Таким важными были и остаются восстановимость агломерата, его прочность и гранулометрический состав, т. к. эти параметры определяют технико-экономические и экологические показатели работы доменных печей.

Список использованных источников

1. Waters A. G., Lister J. D. and Nicol S. K., A Mathematical Model for the Prediction of Granule Size Distribution for Multicomponent Sinter Feed // ISIJ International (April, 1989). Vol.29, No. 4. Pp. 274–283. ISSN 0915-1559.
2. Kasai E., Rankin W. J., Lovel R. R and Omori Y. An analysis of the structure of iron ore sinter cake // ISIJ International (August, 1989). Vol. 29, No. 8. Pp. 635–641. ISSN 0915-1559.

3. Kasai E., Batcaihan B., Omori Y., Sakamoto N. and Kumasaka A. Permeation characteristics and void structure of iron ore sinter cake // *ISIJ International* (November, 1991). Vol. 31, No. 11. Pp. 1286–1291. ISSN 0915-1559.
4. Akiyama T., Hohta H., Takahashi R., Waseda Y. and Yagi J. Measurement and modeling of thermal conductivity for dense iron oxide and porous iron ore agglomerates in stepwise reduction // *ISIJ International* (July, 1992). Vol. 32, No. 7. Pp. 829–837. ISSN 0915-1559.
5. Yang L. X. and Matthews E. Sintering reactions of magnetite concentrates under various atmospheres // *ISIJ International* (November, 1997). Vol. 37, No. 11. Pp. 1057–1065. ISSN 0915-1559.
6. Yamaoka H. and Kawaguchi T. Development of a 3-D sinter process mathematical simulation model // *ISIJ International* (April 2005). Vol. 45, No.4. Pp. 522–531. ISSN 0915-1559.
7. Mitterlehner J., Loeffler G., Winter F., Hofbauer H., Smid H., Zwittag E., Buergler T. H., Palmer O. and Stiasni H. Modeling and Simulation of Heat Front Propagation in the Iron Ore Sintering Process // *ISIJ International* (January, 2004). Vol. 44, No. 1. Pp. 11–20. ISSN 0915-1559.
8. Cumming M. J. and Thurlby J. A. Developments in modeling and simulation of iron ore sintering // *Ironmaking and Steelmaking* (April, 1990). Vol. 17, No. 4. Pp. 245–254, ISSN 0301-9233.
9. Nath N. K., Silva A. J. and Chakraborti N. Dynamic Process Modeling of Iron Ore Sintering // *Steel Research* (July, 1997). Vol. 68, No.7. Pp. 285–292, ISSN 1611–3683.
10. Jose Adilson de Castro. Modeling Sintering Process of Iron Ore, Sintering - Methods and Products, Dr. Volodymyr Shatokha (Ed.), ISBN: 978-953-51-0371-4, InTech.
11. Venkataramana R., Gupta S. S., Kapur P. C. and Ramachandran N. Mathematical Modeling and Simulation of the Iron Ore Sintering Process // *Tata Search*, 1998.
12. Vanderheyden B. and Mathy C. Mathematical model of the sintering process taking into account different input gas conditions // *Revue de Métallurgie*. 2001. No. 3. Pp. 251–257.
13. Базилевич С. В., Вегман Е. Ф. Агломерация. – М.: Metallurgy, 1967. 366 с.
14. Коротич В. И., Пузанов В. П. Газодинамика агломерационного процесса. М.: Metallurgy, 1969. – 208 с.
15. Вегман Е. Ф. Окускование руд и концентратов. – М.: Metallurgy, 1970. – 343 с.
16. Теплотехника окускования железорудного сырья / С. Г. Братчиков, Ю. А. Берман, Я. Л. Белоцерковский [и др.]; под ред. С. Г. Братчикова. М.: Metallurgy, 1970. – 344 с.
17. Китаев Б. И., Тимофеев В. Н., Боковиков Б. А., Малкин В. М., Швыдкий В. С., Шкляр Ф. Р., Ярошенко Ю. Г. Тепло- и массообмен в плотном слое. – М.: Metallurgy, 1972. – 432 с.
18. Бабушкин Н. М., Братчиков С. Г., Намятов Г. Н., Швыдкий В. С., Ярошенко Ю. Г. Охлаждение агломерата и окатышей. – М.: Metallurgy, 1975. – 208 с.
19. Карабасов Ю. С., Валавин В. С. Использование топлива в агломерации. М.: Metallurgy, 1978. – 284 с.
20. Коротич В. И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке. М.: – Metallurgy, 1978. – 208 с.
21. Пузанов В. П., Кобелев В. А. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз. – Екатеринбург: 2001. – 634с.
22. Коротич В. И., Фролов Ю. А., Бездежский Г. Н. Агломерация железных руд. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2004. – 400 с.

23. Клейн В. И., Майзель Г. М., Ярошенко Ю. Г., Авдеенко А. А. Теплотехнические методы анализа агломерационного процесса / под ред. Ю.Г. Ярошенко – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2004. – 224 с.
24. Коротич В. И., Фролов Ю. А., Каплун Л. И. Агломерация: учебное пособие – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 416 с.
25. Фролов Ю. А., Полоцкий Л. И., Кобелев В. А., Конопляник В. В. Трехмерная динамическая модель процесса агломерации // Бюллетень ЦНИИЧМ. –2005. – № 11. – С. 154–162.
26. Новак С. Б., Гармаш Н. И., Мартыненко В. А., Мартыненко А. В. Теория и практика управления агломерационным процессом. Кривой Рог. ООО «Этюд-Сервис» 2006. – 340 с.
27. Фролов Ю. А., Конопляник В. В., Исаенко Г. Е. [и др.]. Анализ процессов сушки, конденсации и газодинамики слоя в начальном периоде агломерации // Сталь. 2008. № 6. С. 5–13.
28. Теплотехника процессов агломерации / под ред. Б. А. Боковикова. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. 267 с. / В. И. Клейн, Б. А. Боковиков, С. Н. Евстюгин, А. А. Кутузов, И. С. Берсенева.

УДК 669-5

В. Ю. Поволоцкий, Б. А. Боковиков, В. А. Горбачев,

Ю. В. Ланцов, С. Ю. Плотникова

ООО «Научно–производственное внедренческое предприятие ТОРЭКС»,

г. Екатеринбург, Россия,

ОАО «ОЭМК», г. Старый Оскол, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЗАЦИИ ОКАТЫШЕЙ ДЛЯ УСТАНОВОК ПРЯМОГО ПОЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

Аннотация

Разработан программный комплекс балансовой модели для установок прямого получения железа («АРМ Технолога») и кинетико-динамической модели процесса металлизации окатышей в шахтной печи. Этот комплекс предназначен для анализа и прогнозов УМ, а также для оптимизации параметров и управления работой ШП в качестве «Советчика мастера».

Ключевые слова: шахтная печь; установка металлизации; прямое получение железа, программный комплекс.

Abstract

The program suite of balance model has been developed towards DRI machines (“Automated workstation of process engineer”) along with kinetic-and-dynamic model of pellet metallization process in the shaft furnace. This suite is meant to be used for analysis and evaluation procedure of metallization machine as well as for optimization of the parameters and operation control of shaft furnace. Furthermore that suite shall be principally used as wizard.

© Поволоцкий В. Ю., Боковиков Б. А., Горбачев В. А., Ланцов Ю. В., Плотникова С. Ю., 2014